



(19) BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

(12) Offenlegungsschrift  
(10) DE 43 24 960 A 1

(51) Int. Cl. 6:  
**F01D 5/14**  
F 01 D 5/16  
F 04 D 29/66  
F 04 D 29/34

(21) Aktenzeichen: P 43 24 960.4  
(22) Anmeldetag: 24. 7. 93  
(23) Offenlegungstag: 26. 1. 95

(71) Anmelder:  
MTU Motoren- und Turbinen-Union München GmbH,  
80995 München, DE

(72) Erfinder:  
Roßmann, Axel, 85757 Karlsfeld, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht zu ziehende Druckschriften:

DE-PS 4 69 002  
US 29 48 506  
US 29 16 258  
US 27 72 854

JP 59-150903 A.: In: Patents Abstracts of Japan,  
M-348, Dec.26, 1984, Vol.8, No.284;

(54) Laufrad einer Turbomaschine, insbesondere einer Turbine eines Gasturbinentriebwerks

(57) Es wird ein Laufrad einer Turbomaschine, insbesondere einer Turbine eines Gasturbinentriebwerks angegeben, bei der die Laufschaufeln mit einer mehrzahnigen Profilierung der Schaufelfüße in korrespondierend ausgeformten Axialnuten des Radkranzes verankert und über dem Umfang schwingungsdämpfend aneinander abgestützt sind; dabei soll das Laufrad abwechselnd mit Laufschaufeln geringerer oder größerer Masse bestückt sein, die sich aus unterschiedlicher Dichte des Schaufelmaterials ergibt.

DE 43 24 960 A 1

TEST AVAILABLE COPY

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Laufrad nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Der Einsatz warmfester, leichter und spröder Legierungen (z. B. intermetallische Phasen), aber auch von Keramikwerkstoffen für Rotorschaufeln scheitert nicht zuletzt an der niedrigen Schlagzähigkeit und an dem damit verbundenen besonderen Risiko eines katastrophalen Schaufelschadens als Folge eines Fremdkörper-eintritts oder eines Schaufelbruches. Bisher für Rotor-schaufeln bzw. Laufschaufeln verwendete warmfeste und hoch-legierte Werkstoffe, z. B. Ni- oder Co-Basislegierungen, haben zwar eine ausreichende Schlagzähigkeit, belasten jedoch die Scheiben hochtouriger Turbi-nen, z. B. Niederdruckturbinen, durch ihr relativ hohes spezifisches Gewicht derart, daß nur verhältnismäßig geringe Lebensdauern der Scheiben durch die am äußeren Umfang der Radkränze auftretenden hohen Randlasten zu erwarten sind.

Ein weiteres Problem stellt die Beherrschung relativ großer Anregungsenergien für Schaufelschwingungen dar, insbesondere mit Rücksicht auf die zur Beherr-schung der Fliehkraftbeanspruchungen notwendige Bauteilfestigkeit der Rotorschaufeln, so daß ein erhö-hetes Risiko eines Schaufelbruches durch Schwingermü-dung besteht.

Aus der US-PS 2,772,854 ist ein Laufrad nach der eingangs genannten Art bekannt, bei dem die Schaufel-blätter der Laufschaufeln bei entsprechender Zentrifü-galkraftbelastung schwingungsdämpfend aneinander abgestützt werden sollen. Hierzu weist der bekannte Fall jeweils zwischen einem Schaufelpaar unterschiedlich lang in Umfangsrichtung auskragende zungenartige Körper auf, die zwischen in axialer und in Umfangsrich-tung sich überlappenden Enden einen Abstandspalt aus-bilden, der in einem vorgegebenen Betriebspunkt zu Null wird; so daß gegenseitige Energien aus Schaufel-schwingungen durch Bauteilreibung zwischen den Enden aufgezehrt werden sollen.

Der Erfundung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Laufrad nach der eingangs genannten Art (Oberbegriff des Patentanspruchs 1) anzugeben, mit dem unter Beherr-schung der aus vergleichsweise hohen Drehzahlen und Fliehkraftbeanspruchungen resultierenden Belastun-gen, die an den Schaufeln und im äußeren Umfangsbereich der Scheibe (Radkranz) auftreten, eine gewichtlich relativ leichte Rotor- bzw. Scheibenkonstruktion ermöglicht wird.

Die gestellte Aufgabe ist gemäß Kennzeichnungsteil des Patentanspruchs 1 erfundungsgemäß gelöst.

Am Radkranz der Radscheibe bzw. des Laufrades sind dabei jeweils pro leichter und schwerer Laufschaufeln die fuß- und entsprechenden Geometrien der Axial-nuten auf die örtlich jeweils herrschenden Kraft- und Flächenbelastungen abgestimmt gestaltet. Es sollen da-bei also die jeweils eigenständig pro leichter und schwerer Laufschaufel bei entsprechender Drehzahl- und Fliehkräfteinwirkung an gegenseitigen Kontaktflächen (Fuß/Nut) herrschenden Momente aus Auflagekräften des Schaufelfußes (z. B. Tannenzäpfen-Fuß) in Multipli-kation mit dem örtlichen Querabstand (Hebelarm) zur Schaufel-Trägheitsachse ausgeglichen werden.

Die Erfindung ermöglicht die Schaffung einer gewichtlich vergleichsweise leichten Radscheibe, insbe sondere z. B. gegenüber Turbinenrädern, die komplett mit Laufschaufeln aus einem temperaturbeständigen hoch-legierten metallischen Werkstoff, z. B. einer Ni-

oder Co-Basis-Legierung, gefertigt sind. Dadurch, daß jede zweite über dem Umfang verteilte Laufschaufel spezifisch gewichtlich wesentlich leichter ist, können die äußeren Randlasten deutlich verringert werden, was zu einer (über-) proportionalen Lebensdauererhöhung des Laufrades bzw. der Radscheibe führt.

Die Verwendung der gewichtlich leichten und schwe-ten Laufschaufeln setzt wiederum die Verwendung von verschiedenen Schaufelwerkstoffen mit sehr unter-10 schiedlichen Eigenschaften voraus, u. a.: Gewicht, Stei-figkeit, und damit unterschiedliche Resonanzen. Infolge eines zu erwartenden unterschiedlichen Schwingverhal-tens ist somit die Erfindung in Kombination mit einer demgemäßen Schwingungsdämpfung ausführbar, z. B. 15 zwischen gegenseitigen Stoßkanten an äußeren Deck-bandssegmenten. Die Vorkehrungen zur Schwingungs-dämpfung können mit Mitteln zur gegenseitigen relati-ven Torsionsfreiheit und -hemmung der Laufschaufeln verknüpft sein.

20 Gemäß der Erfindung ist es ferner vorteilhaft, daß leichte Laufschaufeln trotz an sich mangelnder Schlag-zähigkeit bzw. vorhandener Sprödbrüchigkeit (Kera-mik) ihrer Werkstoffe deshalb eingesetzt werden kön-nen, weil sie sich selbst bei vergleichsweise hoher Biege-beanspruchung jeweils an der nächstfolgenden, z. B. aus 25 einer metallischen Superlegierung gefertigten Lauf-schaufel — innerhalb des gemeinsamen Schaufelver-bands — abstützen können. Die hohe Biegebeanspru-chung kann z. B. verursacht werden durch einen all zu 30 harten Ausstreifvorgang der betreffenden Schaufelspit-zen am Gehäuse oder durch spitzenseitige Verklem-mung eines angesaugten Fremdkörpers gegenüber dem Gehäuse oder durch Fremdkörperaufprall. Selbst im Falle eines dabei — trotz Abstützung — noch auftreten-den Schaufelbruches besteht die Möglichkeit, das Trieb-35 werk ohne weiteren Schaden auslaufen zu lassen oder — die beschädigte Laufschaufel — erst nach darauf fol-gender bodenständiger Inspektion — austauschen zu müssen.

40 Eine bevorzugte Anwendung der Erfindung wird ins-sondere bei den letzten Stufen von vergleichsweise hochtourigen Niederdruckturbinen von Gasturbinen-strahltriebwerken gesehen.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der Patentansprüche 2 bis 14.

Anhand der Zeichnungen ist die Erfindung durch Ausführungsbeispiele weiter erläutert; es zeigen:

Fig. 1 die schematische Darstellung eines rückseiti-gen Abschnitts eines Turbinenlaufrads mit drei Lauf-schaufeln in Zuordnung zu einem quer geschnitten dar-50 gestellten Turbinengehäuseabschnitt,

Fig. 2 eine an einem Laufradabschnitt verkörperte erste fußseitige Anordnungs- und Gestaltungsalternative für gewichtlich leichte und schwere Laufschaufeln, wobei der Laufradabschnitt geradlinig gestreckt in die Zeichnungsebene projiziert ist,

Fig. 3 eine an einem Laufradabschnitt verkörperte zweite fußseitige Anordnungs- und Gestaltungsalternative für gewichtlich leichte und schwerere Laufschaufeln, wobei der Laufradabschnitt geradlinig gestreckt in die Zeichnungsebene projiziert ist,

Fig. 4 eine geradlinig gestreckt in die Zeichnungsebene projizierte äußere Ansicht einer drei Laufschaufeln eines Laufrads nach Fig. 1 betreffenden Deckbandkon-65 struktion und

Fig. 5 eine in Blickrichtung X der Fig. 4 gesehene Stirnansicht eines Deckbands unter Ausbildung einer Labyrinth-Dichtung in Zuordnung zu einem Turbinen-

gehäuseabschnitt nebst Einlaufbelag, jeweils in Achsrichtung geschnitten dargestellt.

Ein Turbinenlaufad 1 (Fig. 1) ist fortlaufend abwechselnd mit gewichtlich leichten bzw. schwerer Laufschaufeln 2 bzw. 3 bestückt; dabei sind die Laufschaufeln 2 bzw. 3 in gleichmäßigen Abständen über dem Umfang verteilt angeordnet und jeweils mit ihren Schaufelfüßen 2' bzw. 3' in profilmäßig darauf abgestimmten Axialnuten 4 bzw. 5 am Radkranz 6 in Umfangs- und in radialer Richtung gehalten. Über radial innen liegende Fußplatten 7 können die Laufschaufeln 2 bzw. 3 am Radkranz 6 bzw. geringfügig oberhalb der Radkranzoberfläche zusätzlich in Umfangsrichtung aneinander abgestützt werden. In der schematischen Darstellung nach Fig. 1 sind die jeweils etwa tannenzapfen- bzw. tannenbaumfußartig gestalteten Schaufelfüße 2' bzw. 3' der Einfachheit halber zunächst in jeweils gleichförmiger Gestaltung gezeichnet. Im Hinblick auf betriebsgemäß zu erwartende Schwingerrégungen der Laufschaufeln 2' bzw. 3', die insbesondere bezüglich leichter und schwerer Schaufelwerkstoffe, materialspezifisch bedingte unterschiedlich stark ausgeprägte Schaufelschwingungen erwarten lassen, sind Vorkehrungen zur schaufelblattseitigen Schwingungsdämpfung vorzusehen. Hierzu ist eine spezielle schaufelkopfseitige Deckbandkonstruktion vorgesehen (Fig. 1 und 4); sie besteht hier z. B. aus jeweils etwa gleichgroßen Deckbandsegmenten 8, 8' pro Laufschaufel 2 bzw. 3; gegenseitige Spalte S an benachbarten Stoßkanten der Deckbandsegmente 8, 8' werden bei Erreichen eines bestimmten Betriebspunktes, der für ausgeprägte Schaufelschwingungen charakteristisch ist, weitestgehend unter gegenseitiger Bauteilreibung minimiert, wodurch wiederum die Schaufelschwingungen drastisch gedämpft werden können. Individuelle Schaufeltorsionen können durch jeweils örtliche Querspalte S' zwischen den axial bzw. schräg zur Rotorachse verlaufenden bzw. angestellten Spalten S aufgenommen und örtlich begrenzt werden. Die Spalte S bzw. S' charakterisieren einen etwa zick-zack- bzw. sägezahnartigen Stoßkantenverlauf zwischen den Deckbandsegmenten 8, 8'. An den Stoßkanten könnten die betreffenden örtlichen Enden der Deckbandsegmente auch in gegenseitiger Überlappung abdichtend und schwingungsdämpfend ausgeführt sein.

Gemäß Fig. 5 können die Deckbandsegmente, z. B. 8, außen mit sich in Umfangsrichtung erstreckenden Labyrinth-Spitzen 9 versehen sein, die mit einem Einlaufbelag 10 am Turbinengehäuse 11 eine labyrinthartige, schaufelkopfseitige Spaltdichtung für die Heißgasströmung in der Turbine ausbilden. Abweichend von Fig. 4 und 5 wäre es möglich, die Labyrinth-Spitzen 9 an eine über dem Umfang in sich geschlossene Gehäusestruktur anzubinden, innerhalb derselben die Laufschaufeln schwingungsdämpfend und torsionshemmend anzuordnen wären, etwa im Sinne der Fig. 4.

Unter Verwendung der schon in Fig. 1 gewählten Bezugsszeichen, verkörpern die Fig. 2 und 3 Anordnungen mit für die gewichtlich leichten bzw. schweren Laufschaufeln 2 bzw. 3 jeweils eigenständigen, sich von außen nach innen in Richtung auf den Nutgrund der Axialnuten 4 bzw. 5 verjüngenden Nut- und damit Fußprofilierungen; dabei soll die jeweilige Nut- und damit Fußprofilverjüngung V (leichte Laufschaufeln 2) bzw. V' (schwere Laufschaufeln 3) auf den unterschiedlichen Kraftfluß der leichten und schweren Laufschaufeln 2 bzw. 3 abgestimmt gestaltet sein. In Fig. 2 ergibt sich für die gewichtlich leichten Laufschaufeln 2 jeweils ein gleicher aber kleinerer Öffnungswinkel  $\alpha_2$  der keil- oder

V-förmig spitz endenden Profilverjüngung V als derjenige ( $\alpha_3$ ) für die gewichtlich schweren Laufschaufel 3. Ferner ergeben sich in Fig. 2 jeweils im wesentlichen beiderseits ihrer Mittellinien symmetrisch zahnartig ausprofilierte Scheibenköcher 12 zwischen je zwei unterschiedlich profilierten Axialnuten 4 bzw. 5 bei jeweils gleichen radialem Nuttiefe T und bei jeweils gleichen mittleren Umfangsabständen U bzw. U' sämtlicher Axialnuten 4 bzw. 5 und der Scheibenköcher 12.

In Fig. 3 bildet sich der Keilwinkel  $\alpha_2$  der Profilverjüngung V für die leichten Laufschaufeln 2 gleich oder etwas kleiner als der Keilwinkel  $\alpha_3$  der Profilverjüngung V' für die schweren Laufschaufeln 3 aus. Auf beiden Seiten bzw. jeweils rechts und links weist dabei jeder Scheibenköcher 12 zwischen zwei Axialnuten 4 bzw. 5 eine unterschiedlich gestaltete und geneigte Profilkontur auf; dabei ergeben sich unsymmetrisch gestaltete Scheibenköcher 12 mit gegenseitig unterschiedlichen, relativ mittigen Umfangsabständen, d. h.,  $a_3 < a_2$ . Außerdem weicht Fig. 3 von Fig. 2 dadurch ab, daß die jeweiligen Axialnuten 4 bzw. 5 am unteren Ende, gegenüber der übrigen Profilkontur, in einen vergleichsweise großen, am Nutgrund endenden schwalbenschwanzartigen Querschnitt übergehen. In Fig. 3 (rechts) sind die betreffenden Axialnuten 4 bzw. 5 mit Schaufelfüßen 2' bzw. 3' gewichtlich leichter bzw. schwerer Laufschaufeln 2 bzw. 3 bestückt. Bei jeweils gleicher radialer Nuttiefe T ergeben sich in Fig. 3 ferner gleiche relativ mittige Umfangsabstände A der Schaufelfüße 2' bzw. 3' und (A') der Axialnuten 4 bzw. 5.

In Ausgestaltungen stellt sich die Erfindung ferner wie folgt dar.

Die schweren Laufschaufeln 3 können aus einer hochlegierten, warmfesten metallischen Legierung, die leichten Laufschaufeln 2 aus einer intermetallischen Verbindung (intermetallische Phasen), insbesondere einem Nickel-, oder Titanaluminid und Legierungen derselben bestehen.

Ferner können die schweren Laufschaufeln 3 aus einem warmfesten hoch-legierten metallischen Werkstoff, die leichten Laufschaufeln 2 aus einem hochtemperaturbeständigen Leichtbaumaterial mit globularer Zellstruktur, z. B. hohlkugelartig, gefertigt sein. Die Anwendung genannter oder anderweitiger intermetallischer Verbindungen, z. B. durch Sinterverfahren, ist möglich.

Ferner können die schweren Laufschaufeln 3 aus einem hoch-legierten hoch-temperaturfesten metallischen Werkstoff, die leichten Laufschaufeln 2 aus einem hoch-temperaturbeständigen keramischen Werkstoff gefertigt sein.

Ferner können die leichten Laufschaufeln 2 aus einem durch Keramikfasern verstärkten, ingenieurkeramischen Werkstoff gefertigt sein.

Ferner können die leichten Laufschaufeln 2 aus Siliziumkarbidfasern verstärktem Siliziumkarbid gefertigt sein.

Ferner können die leichten Laufschaufeln 2 aus Siliziumkarbid oder selbstgesintertem Siliziumkarbid oder heißgepreßtem Siliziumkarbid gefertigt sein.

Ferner können die leichten Laufschaufeln 2 aus Siliziumnitrid gefertigt sein, das reaktionsgesintert oder selbstsinternd oder heißgepreßt ist.

Sämtliche genannten Werkstoffalternativen für die Laufschaufeln geringerer Masse (leichte Laufschaufeln) können z. B. jeweils in Kombination mit einem hoch-legierten, warmfesten metallischen Werkstoff für die Laufschaufeln größerer Masse, z. B. einer Ni- oder Co-Basis-Legierung, bei einer heißgasbeaufschlagten Tur-

bine vorgesehen werden.

Nicht dargestellt — können sämtliche Laufschaufeln 2; 3 auch in einem mittleren Umfangsbereich, ähnlich einer Deckband-Konstruktion nach Fig. 4, torsionshemmend und individuell schwingungskompensatorisch aneinander abstützbar sein.

Eine zuvor genannte Deckbandkonstruktion kann aus schaufelintegralen, beidseitig eines Schaufelblatts in Umfangsrichtung auskragenden Elementen bestehen, die an benachbarten, über dem Umfang verteilten Stoßkanten in einem vorgegebenen Betriebspunkt in axialer und in Umfangsrichtung aneinander abgestützt sind.

Sofern nicht schon ausdrücklich beansprucht, sind die zuvor beschriebenen und/oder zeichnerisch dargestellten Merkmale ebenfalls Bestandteil der vorliegenden Erfindung.

#### Patentansprüche

1. Laufrad einer Turbomaschine, insbesondere einer Turbine eines Gasturbinentreibwerks, bei der die Laufschaufeln mit einer mehrzahnigen Profilierung der Schaufelfüße in korrespondierend ausgeformten Axialnuten des Radkranzes verankert und über dem Umfang schwingungsdämpfend aneinander abgestützt sind, dadurch gekennzeichnet, daß das Laufrad (1) abwechselnd mit Laufschaufeln geringerer und größerer Masse bestückt ist, die sich aus unterschiedlicher Dichte des Schaufelmaterials ergibt.
2. Laufrad nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaufelfüße (2'), die Fußprofile und die Axialnuten (4) der Laufschaufeln (2) geringerer Masse auf die gegenüber den Laufschaufeln (3) größerer Masse reduzierten Fliehkräftebeanspruchungen abgestimmt gestaltet sind.
3. Laufrad nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß jeweils gleiche radiale Fußlängen und Nuttiefen für sämtliche Laufschaufeln vorgesehen sind.
4. Laufrad nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Laufschaufeln (2; 3) ein sich in Richtung auf den Nutgrund gleichmäßig verjüngendes Tannenzapfen-Fußprofil aufweisen, wobei die Profilverjüngung (V, V') je nach Masse der Laufschaufeln (2; 3) auf die unterschiedlich große Zugbelastung abgestimmt ist.
5. Laufrad nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Fuß- und Nutgeometrien der Laufschaufeln (2; 3) symmetrisch gestaltet, jedoch die Zahn-Profilierungen eines zwischen zwei Axialnuten (4, 5) belassenen Scheibenköchers (12) auf der linken und rechten Seite unterschiedlich gestaltet sind.
6. Laufrad nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Laufschaufeln größerer Masse aus einem hoch-legierten, warmfesten metallischen Werkstoff bestehen.
7. Laufrad nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Laufschaufeln geringerer Masse aus einer warmfesten intermetallischen Verbindung, insbesondere einem Nickel- oder Titanaluminid und Legierungen derselben bestehen.
8. Laufrad nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, die Laufschaufeln geringerer Masse aus einem temperaturbeständigen Leichtbaumaterial mit globularer Zell-

struktur gefertigt sind.

9. Laufrad nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Laufschaufeln geringerer Masse aus einem keramischen Werkstoff gefertigt sind.

10. Laufrad nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Laufschaufeln geringerer Masse aus einem keramischen Werkstoff gefertigt sind, der durch Keramikfasern verstärkt ist.

11. Laufrad nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Laufschaufeln geringerer Masse aus durch Siliziumkarbidfasern verstärktem Siliziumkarbid gefertigt sind.

12. Laufrad nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Laufschaufeln geringerer Masse aus Siliziumkarbid gefertigt sind, das selbstsinternd oder heißgepreßt ist.

13. Laufrad nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Laufschaufeln geringerer Masse aus Siliziumnitrid gefertigt sind, das reaktionsgesintert oder selbstsinternd oder heißgepreßt ist.

14. Laufrad nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß sämtliche Laufschaufeln (2; 3) in einem mittleren Umfangsbereich und/oder im schaufelkopfseitigen Umfangsbereich torsionshemmend und schwingungsdämpfend in einem vorgegebenen Betriebspunkt aneinander abstützbar sind.

15. Laufrad nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß schaufelintegrale, jeweils beidseitig eines Schaufelblatts in Umfangsrichtung auskragenden Elemente vorgesehen sind, an deren benachbarten Stoßkanten die Laufschaufeln in Umfangs- und in axialer Richtung in einem vorgegebenen Betriebspunkt aneinander abstützbar sind.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 1

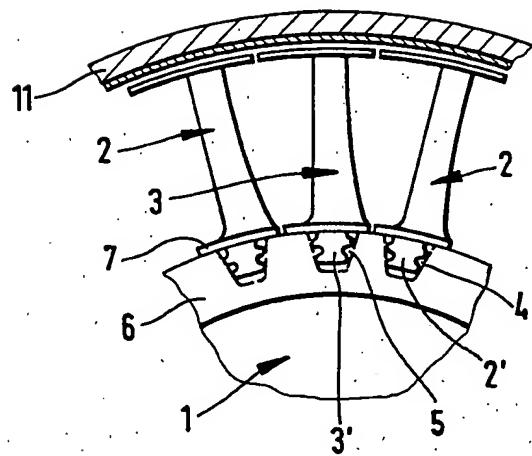


FIG. 2

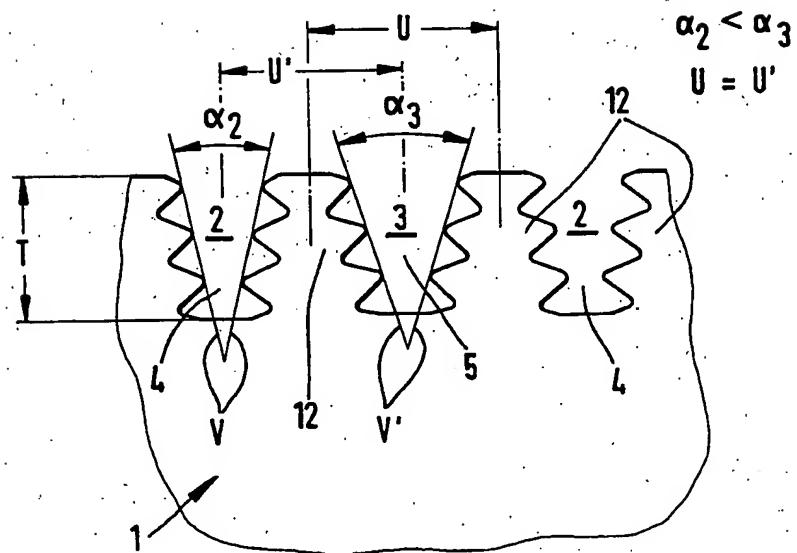


FIG. 3

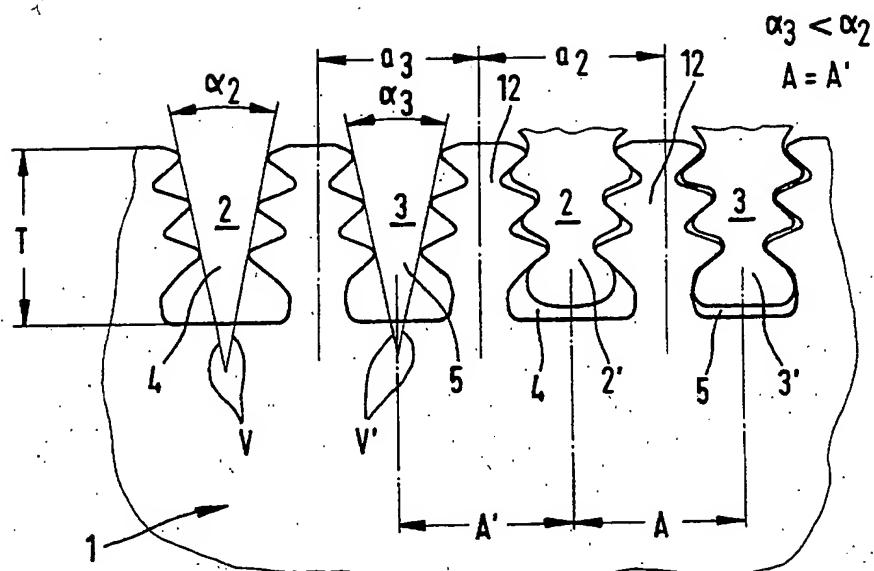


FIG. 4

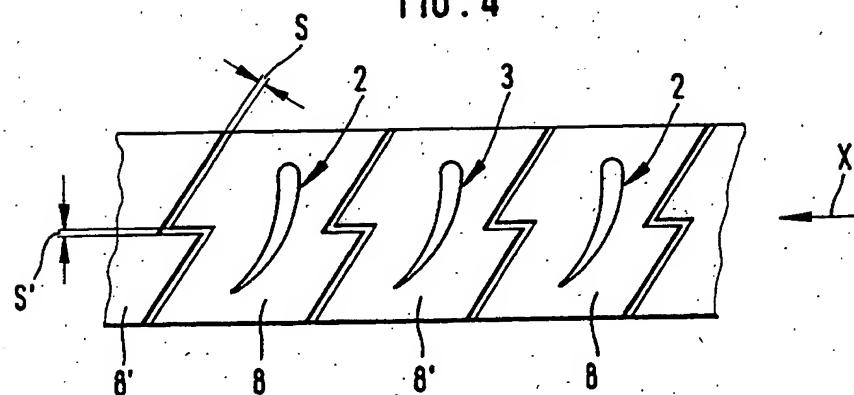
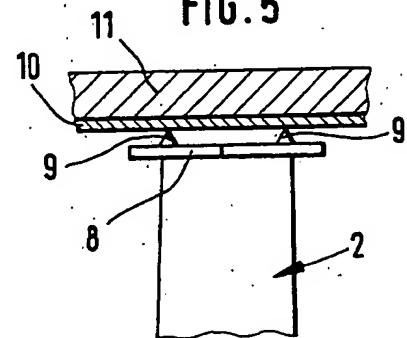


FIG. 5



408 064/437